

ОЦЕНКА УРОВНЯ СМЕРТНОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ SARS-CoV-2 В РЕГИОНАХ РОССИИ, НА ОСНОВЕ ЭКОНОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В.С. Степанов

ФГБУН Центральный экономико-математический институт Российской академии наук, Москва, Россия

Резюме. Объектами исследования были официальные данные по заболеваемости и смертности от COVID-19 в российских регионах, а также региональные медико-демографические и экологические данные за последние годы. Математическими методами работы являются корреляционный и регрессионный анализ, методы проверки статистических гипотез. Сначала специфицируется модель регрессии, имеющая переменную структуру; свободный член в ней отличается от региона к региону в зависимости от сочетания значений ряда фиктивных переменных (dummy). На роль зависимой переменной Y^t выбиралась смертность, привязанная в сводной таблице оперативного штаба к суткам с отсчетом t , причем основной причиной смерти считалась COVID-19. Комплекс объясняющих переменных включал две факторные переменные, которые изменяются ежесуточно, причем с лагами относительно t . Также в этот комплекс входил еще ряд переменных, которые не изменялись во времени: показатель обеспеченности региона врачами ряда специальностей и четыре dummy-переменные. Одна из них кодировала южную принадлежность региона: ЮФО или СКФО. Три прочие характеризовали повышенное загрязнение атмосферного воздуха в населенных пунктах за последние годы, а также радиационное загрязнение территории и здоровье жителей регионов по 10 классам болезней (для системы кровообращения, эндокринной системы и проч.). Значения этих dummy-переменных были получены по открытым данным Росстата и др. Параметры модели оценивались методом наименьших квадратов по обучающей таблице, которая включала 40 регионов, где отсчет t переменной Y^t входил за дату 1.xi.2021. В итоге построена статистическая модель с ошибкой аппроксимации 3%; для $\frac{3}{4}$ регионов из этой таблицы она оказалась 1,94 ($\pm 1,5$)%. Приводятся графики с ежесуточными прогнозами смертности от COVID-19 в первой половине ноября 2021 г. для семи регионов в сравнении с фактическими значениями. Модель может быть полезной при разработке медико-демографической политики в регионах, а также при построении уточненных моделей секторного типа, состоящих из систем дифференциальных уравнений (SEIRF, SIRD и др.).

Ключевые слова: модель регрессии, загрязнение воздуха, SARS-CoV-2, моделирование смертности, заболеваемость населения, общественное здоровье, прогноз смертности, регионы России.

ASSESSING SARS-CoV-2-RELATED MORTALITY RATE IN RUSSIAN REGIONS, BASED ON THE ECONOMETRIC MODEL

Stepanov V.S.

The Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Abstract. The objects of the study were the daily data on the population morbidity and mortality due to coronavirus disease 2019 (COVID-19) in Russian regions, as well as regional medical, demographic and environmental data recorded

Адрес для переписки:

Степанов Владимир Сергеевич
117418, Россия, Москва, Нахимовский пр., 47,
ФГУН Центральный экономико-математический институт РАН.
Тел.: 8 (916) 872-52-07. E-mail: _stepanov@cemi.rssi.ru

Contacts:

Vladimir S. Stepanov
117418, Russian Federation, Moscow, Nakhimovsky pr., 47,
Central Economics and Mathematics Institute of the RAS.
Phone: +7 (916) 872-52-07. E-mail: _stepanov@cemi.rssi.ru

Для цитирования:

Степанов В.С. Оценка уровня смертности, обусловленной SARS-CoV-2 в регионах России, на основе эконометрической модели // Инфекция и иммунитет. 2022. Т. 12, № 4. С. 783–789. doi: 10.15789/2220-7619-ASR-1846

Citation:

Stepanov V.S. Assessing SARS-CoV-2-related mortality rate in Russian regions, based on the econometric model // Russian Journal of Infection and Immunity = Infektsiya i immunitet, 2022, vol. 12, no. 4, pp. 783–789. doi: 10.15789/2220-7619-ASR-1846

in recent years. COVID-19 is a contagious disease caused by the novel coronavirus (SARS-CoV-2). The mathematical methods consist of correlation and regression analysis, methods of testing statistical hypotheses. First, a multiple Variable Structure Regression should be specified. The intercept in the model differs from region to region, depending on the combination of values for dummy variables. The role of the dependent variable Y^t was chosen as the cumulative mortality published by the operational headquarters for the regions that has been linked to day t , so that COVID-19 was considered the main cause of death. The complex of explanatory variables included two factorial variables that changed daily, and had a lag relative to t value. Also, this complex included a number of variables that did not change with the growth of t : the explanatory variable with the region's availability with doctors of certain specialties; and four dummy variables. One of them coded the region's belonging to the two southern Russian Federal Districts. Three other variables characterized the increased air pollution in settlements recorded in recent years, as well as the level of radiation pollution of the region's territory and the population health estimated for 10 classes of diseases (for the circulatory system, endocrine system, etc.). The values of such dummy variables were obtained from open data from the Federal State Statistics Service (Rosstat) etc. The model parameters were estimated by the least squares method using the training table, which included 40 Russia's regions, the t parameter for variable Y^t was assessed starting from November, 1, 2021. As a result, a statistical model was built with an approximation error equal to 3%. For $\frac{3}{4}$ regions of the regions examined this error was 1.94 (± 1.5)% for the value Y^t that has been fixed on the 1st Nov. The plots show daily prediction for mortality rate due to COVID-19 in the first half of November for seven Russian regions compared with actual data. The model can be useful in development of medical and demographic policy in geographic regions, as well as generating adjusted compartment models that based on systems of differential equations (SEIRF, SIRD, etc.).

Key words: regression model, air pollution, SARS-CoV-2, mortality modeling, morbidity, public health, mortality forecast, Russia's regions.

Прогнозирование смертности от COVID-19 на территориях стран и их регионов является актуальной проблемой. Это важно при разработке оперативных профилактических мер в регионах, а также для принятия мер по снижению смертности. Последнее — стратегическая цель Правительства РФ.

Вопросы математического моделирования в эпидемиологии сжато освещаются в [15]; небольшой обзор подходов к моделированию заболеваемости и смертности от COVID-19 приводится в [12]. Дополняя его, отметим, что эконометрическое моделирование этой смертности выполнено в [18]; к временным рядам также применялся подход Бокса и Дженкинса [19]. Сопоставление точности моделей, созданных известными научными центрами, сделано в [16]. Из весьма успешных работ по моделированию смертности в регионах можно выделить [2, 8, 9, 17].

Ряд исследователей в качестве инструментария выбирают регрессионный анализ [3, 4, 6, 12, 18]. Так, в [4] рассматривалась «избыточная смертность» по данным ЗАГС и строились линейные модели; в результате на тех или иных отрезках пандемии наиболее информативными оказались различные факторы. Высокая информативность одного из показателей, связанных со смертностью от COVID-19, была выявлена в [3]. Этот показатель рассчитывается как доля летальных случаев среди случаев с известным исходом (умерших и выздоровевших), которые ранее входили в список зарегистрированных лиц. Он был назван Э.М. Гольдштейном «коэффициентом летальности», поэтому ниже он именуется нами как «индикатор Гольдштейна» (ИГ) (использование «летальности» является здесь нестандартным, согласно О.М. Драпкиной и со-

авт. [2020]). Также важными оказались распространенность активных случаев и обеспеченность населения врачами-специалистами [12]. Влияние загрязненности атмосферного воздуха на заболеваемость изучалось в [6].

Целью исследования является построение (с оценкой по точности) модели линейной регрессии, которая связывает смертность от COVID-19 в регионах с комплексом объясняющих факторных переменных. На основе этой модели можно выполнять краткосрочный прогноз смертности и более эффективно планировать медицинские ресурсы.

Материалы и методы

Регионами, попавшими в таблицу с обучающими данными, были: 14 областей ЦФО, 2 региона из СЗФО и 4 — из ПФО; в состав южных округов входило 11, а 9 оставшихся находятся на Урале, Дальнем Востоке и в Сибири. В выбранных регионах проживает почти $\frac{1}{2}$ населения страны; в итоге таблица включала $n = 40$ строк. В таблицу не вошли города федерального уровня, ряд промышленных регионов (Липецкая, Вологодская области и многие другие), а также — территории Арктики, ряд регионов СКФО, Сибири, Дальнего Востока, Урала.

Некоторые объясняющие факторы были качественными (ординальными) и номинальными по своей природе, поэтому их градации кодируются фиктивными переменными (dummy). В качестве факторных переменных были выбраны (индекс t здесь для простоты не пишется):

– X_t — распространенность активных случаев COVID-19 на сутки $t - 10$, относительно суток с отчетом t , к которым в [14] был привя-

зан показатель смертности (т. е. общее количество подтвержденных случаев COVID-19 за вычетом выздоровевших и умерших к суткам $t-10$ в соотношении со среднегодовой численностью населения в 2020 г.) (*Active Cases*);

– X_2 — показатель обеспеченности населения врачами-специалистами (для трех групп: инфекционисты (*И*), врачи санитарно-противоэпидемической группы (*СПГ*) и анестезиологи-реаниматологи (*АР*), но без учета токсикологов; здесь бралась их линейная комбинация: $X_2 = 0,423 \cdot И + 0,267 \cdot СПГ + 0,118 \cdot АР$, где *И* — количество врачей-инфекционистов на 10 тыс. жителей за 2020 г. и т. д.) [5, 7] (*Doctors*);

– X_3 — осредненное значение для ИГ, измеренное в логарифмической шкале, с использованием 7-дневного окна (при обучении это 23.x-29.x), $\text{Log}(\text{Mortality})$ [14];

– d_1 — думми переменная, равная 1 для регионов, в которых наблюдается более низкий уровень популяционного здоровья (*Type 1*);

– d_2 — то же для варианта, когда уровень здоровья был сравнительно высок (*Type 2*);

– d_3 — то же для южных регионов, т. е. регионов из ЮФО, СКФО (*South Region*);

– d_4 — то же, когда наблюдался повышенный уровень загрязнения атмосферного воздуха в населенных пунктах региона за ряд последних лет (*Air Pollution*).

Эти четыре переменные и X_2 влияют лишь на изменение свободного члена в (1).

Для материала обучения были взяты значения фактора X_1 на дату 21.x.2021, а значения Y^t включались здесь на 10 суток позднее, т. е. на 1.xi.2021. При этом на этапе «обучение» использовалось значение Y^t , осредненное за 5 суток: с 30.x по 3.xi.2021. При обработке данных по ИГ использовалась операция осреднения по окну шириной 7 суток, после чего брался натуральный логарифм, в итоге получались значения X_3 . Факторы X_2, d_1, \dots, d_4 предполагались постоянными по t .

Затем оценивались параметры модели регрессии с переменной структурой:

$$Y^t = \beta_0 + \beta_1 X_1^{t-10} + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3^{t-7} + \beta_4 d_1 + \beta_5 d_2 + \beta_6 d_3 + \beta_7 d_4 + \varepsilon, \quad (1)$$

где Y^t — смертность от COVID-19 (отношение количества умерших от этого заболевания за все время пандемии к суткам t к среднегодовой численности населения в 2020 г., умноженное на 100 тыс. [11, 14]). Здесь $X_1, X_2, X_3, d_1, d_2, d_3, d_4$ — объясняющие факторы, β_0 отражает влияние на Y^t неучтенных переменных, ε — случайная величина с $E(\varepsilon) = 0$ и дисперсией σ^2 . Неизвестные параметры $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_7$ и σ^2 оцениваются по таблице с обучающими данными, причем оценки b_0, \dots, b_7

для β -параметров и σ^2 находятся методом наименьших квадратов (МНК) средствами MS Excel. Каждая строка этой таблицы содержит набор $Y^t, X_1, \dots, X_3, d_1, \dots, d_4$ для того или иного региона; факторы X_1, X_2 входили здесь с разными лагами относительно даты привязки показателя смертности в [14]. Отчасти близкий подход применялся ранее при анализе данных по онкологии [13].

Нами выделялись регионы типа 1, в которых в 2015–2020 гг. наблюдалась более высокая заболеваемость населения по некоторым основным классам болезней, зарегистрированных у пациентов с диагнозом, установленным впервые в жизни (на 1 тыс. человек населения). В частности, здесь были рассмотрены болезни системы кровообращения; болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ; врожденные аномалии (пороки развития), деформации и хромосомные нарушения; болезни крови, кроветворных органов и отдельные нарушения, вовлекающие иммунный механизм; болезни органов дыхания; болезни органов пищеварения; болезни мочеполовой системы и новообразования. Также было рассмотрено среднее значение контингентов пациентов со злокачественными новообразованиями за 2016–2020 гг. (численность пациентов, состоящих на учете в лечебно-профилактических организациях, на конец года). Дополнительно учитывались общие коэффициенты смертности за 2020 г. Часть таких регионов сильно пострадала после катастрофы на ЧАЭС; в других регионах или вблизи них действуют АЭС (с не самыми передовыми технологиями). На территории некоторых, или сравнительно недалеко от них, еще во времена СССР был ряд технологических аварий или взрывов [1]. Для 17-ти регионов этого типа выбирались значения переменных $d_1 = 1, d_2 = 0$. К этому типу можно отнести почти половину областей из ЦФО: Брянскую, Владимирскую, Ивановскую, Курскую, Орловскую, Рязанскую, Смоленскую; 7 регионов из СЗФО, ПФО, ЮФО: Архангельскую, Астраханскую, Волгоградскую, Оренбургскую, Ростовскую, Саратовскую области и Республику Удмуртию, а также некоторые регионы из УФО, СФО, ДФО: Тюменскую область, Алтайский край и Еврейскую автономную область.

Для регионов типа 2, наоборот, характерны довольно низкие значения заболеваемости вышеупомянутых восьми классов болезней, а также — относительно малые радиационные загрязнения и/или загрязнения из-за техногенных аварий. Для них принималось $d_1 = 0, d_2 = 1$; к этому типу были отнесены пять регионов: три южных (республики Адыгея, Кабардино-Балкария и Ставрополье), Хабаровский край и Московская область; здесь проживает больше молодого населения, а также в них сравнительно мала доля лиц старших возрастных групп.

Все прочие регионы, вошедшие в материал обучения, кроме регионов типов 1 и 2, имели нулевые значения думми переменных d_1 и d_2 .

Еще одна переменная кодировала южные регионы на карте страны: $d_3 = 1$. Наконец, высокий уровень загрязнения воздуха регулярно выявлялся в Архангельской, Белгородской, Воронежской, Курской, Новосибирской, Ростовской, Саратовской и Смоленской областях, а также в Алтайском, Забайкальском, Приморском и Хабаровском краях, республиках Кабардино-Балкария, Крым и Северная Осетия — Алания [10]. Для всех этих 15-ти регионов, принималось, что $d_4 = 1$.

Математические методы включали корреляционный и регрессионный анализ, методы проверки статистических гипотез. Использовались различные тесты (через t -статистику Стьюдента для гипотез $H_0: \beta_j = 0$ и DW-статистику Дарбина—Уотсона для выявления автокорреляции) и традиционный дисперсионный анализ Р. Фишера. Для корректного использования тестов также применялись критерии согласия распределения остатков с нормальным законом. Так как дисперсия σ^2 неизвестна, то были взяты тесты χ^2 Пирсона и Лилиефорса после анализа эмпирической функции распределения остатков. Условие гомоскедастичности проверялось на диаграммах рассеяния остатков регрессии. Весь статистический анализ и обработка данных выполнялись в MS Excel.

Результаты и обсуждение

В верхней части таблицы приводятся b -коэффициенты, или МНК-оценки β .

В 3-й строке в скобках приводятся модули t -статистик, из которых после проверки соответствующих гипотез следует, что β -коэффициенты отличны от 0. В последней строке приводится

F -статистика Р. Фишера и число степеней свободы v . Все достигнутые уровни значимости (p -values) в тестах Стьюдента и Фишера были ниже 0,001. Также в 5-й строке приводятся стандартная ошибка s , значение DW-статистики, несмещенная оценка коэффициента детерминации R^2 , а также две статистики для критериев согласия: χ^2 и статистика, содержащая расстояние Колмогорова D_n . Наконец, в 4-й строке приводятся средние коэффициенты эластичности. Каждый из них показывает, на сколько процентов изменится смертность Y^i в среднем по таблице обучения, если X_j увеличить на 1%, и при этом зафиксировать значения прочих факторов. Сильнее всего на переменную Y^i влияют обеспеченность врачами и распространенность активных случаев, а несколько слабее — d_1 и X_3 (логарифм скользящего среднего для ИГ). Так, если значение фактора X_2 с обеспеченностью врачами увеличить на 1% (соблюдая нормативы по балансу между специализациями), то смертность снизится на 0,5%.

Модель получилась довольно точной для многих регионов, попавших в таблицу с обучающими данными и сформировавших материал обучения, когда отсчет t привязан в [14] к суткам 1.xi.2021. А именно для 30 регионов ошибка аппроксимации MAPE = 1,94% для модели (1) с b -коэффициентами и со стандартной ошибкой 1,5%. Иногда она была сравнима по точности с моделью из [2]. Для всего материала обучения MAPE (mean absolute percentage error) была 3%; при этом модель объяснила 97,8% разброса переменной Y^i вокруг ее среднего значения. На рисунке показано, как модель (1) с b -коэффициентами работает на «экзамене» при изменении X_1 и X_3 по оси 0- t . Модель можно улучшить, если уточнить данные по врачам-специалистам; другой вариант ее улучшения — регулярно проводить новое обучение: через 5–7 дней.

Таблица. Результаты оценивания, коэффициенты эластичности, статистики

Table. Least square estimates for all parameters, coefficients of elasticity, statistics

Переменная Variable		X_1	X_2	X_3	d_1	d_2	d_3	d_4
Краткое имя переменной Short name of variable		Активные случаи Active Cases	Обеспеченность населения врачами Doctors	\ln (ИГ) Log (Mortality)	Регионы типа 1 Type 1	Регионы типа 2 Type 2	Южные регионы South Regions	Загрязнение атмосферного воздуха Air Pollution
1 МНК-оценки	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7
2 LS estimates	106.46	9.141	-96.988	12.76	47.494	-21.82	26.965	19.116
3 Статистика t t-statistics	(20.7)	(24)	(16.4)	(10.7)	(21.8)	(7.9)	(11.2)	(9.5)
4 Эластичность Elasticity coefficients		0.35	-0.48	0.15	0.14	-0.04	0.05	0.05
5 Статистика Фишера F-stat. = 252,3	$v = 32$	$s = 5.606$	$R^2 = 97,8\%$	$n^{1/2} \cdot D_n = 0.63$	$\chi^2 = 1.36$		DW = 2.10	

Каждый точечный график связан с прогнозом Y^t — распространенности смертности от COVID-19 за сутки t из промежутка $[1.xi, 17.xi]$ — для одного из семи регионов. Здесь дате $1.xi.2021$ для показателя Y^t будет соответствовать отсчет t ; дате $2.xi$ — $t+1, \dots$. Непрерывными и более контрастными линиями на рисунке изображается изменение смертности по факту.

Например, чтобы получить прогнозное значение Y^t на 5 ноября для Подмосковья, надо взять его значения *dummu*-переменных d_1, \dots, d_4 , а также — переменной с врачами X_2 . Все эти пять переменных не изменяются по t ; они лишь скорректируют для региона значение b_0 (см. табл.). От суток к суткам изменяется количество активных случаев; оно легко находится из [14]; для прогноза на $5.xi.2021$ надо брать накопленные данные на $25.x$, когда значение фактора $X_1 = 8,267$ на 1 тыс. жителей (с учетом того, что здесь проживало около 7700 тыс. граждан). Аналогично изменяется и фактор X_3 ; он определяется по набору из нескольких значений ИГ. Для его расчета здесь берутся данные за $22.x, \dots, 28.x$ по количеству выздоровевших g пациентов в регионе и умерших d за каждые сутки [12], затем находятся значения $ИГ = 100 \cdot d / (d+r)$ за 7 суток: с $22.x$ по $28.x$ (Предполагается, что за эти дни имелся хотя бы 1 летальный случай). Потом

берется их среднее значение, а от него — натуральный логарифм, равный 0,3863; это и есть значение X_3 на $25.x$, т. е. середина 7-дневного окна. В результате находится сумма: $9,141 \cdot X_1 + 12,76 \cdot X_3 - 96,99 \cdot X_2 +$ (сумма четырех произведений с *dummu*...) $+ 106,462$, которая считается через b -коэффициенты из таблицы. При этом выражение в скобках равно $-21,82$, так как $d_2 = 1$, а все d_1, \dots, d_3 нулевые (см. текст ниже). Итак, для региона будет $Y^t = 9,14X_1 + 12,76X_3 + 37,9186$, так как здесь $X_2 = 0,48792$. В итоге на дату $5.xi.2021$ получаем прогноз показателя Y^t , равный 118. Для сравнения: смертность из-за новообразований в регионе к концу 2020 г. была 172 [7].

Заметим, что распространенность активных случаев COVID-19 в последней декаде октября была примерно одинаковой в Ленинградской, Московской, Тверской и Костромской областях [14]. Среди них в первой декаде ноября в Тверской области была самая высокая смертность от COVID-19, а также одно из наихудших в РФ мест по коэффициенту общей смертности в 2019–2020 гг. Значения Y^t были здесь близки к значениям в Костромской и Ленинградской областях, а в Подмосковье умирали реже.

Сравнивая средние значения для этой четверки регионов по набору более чем 10 медико-демографических показателей, взятых за 2015–

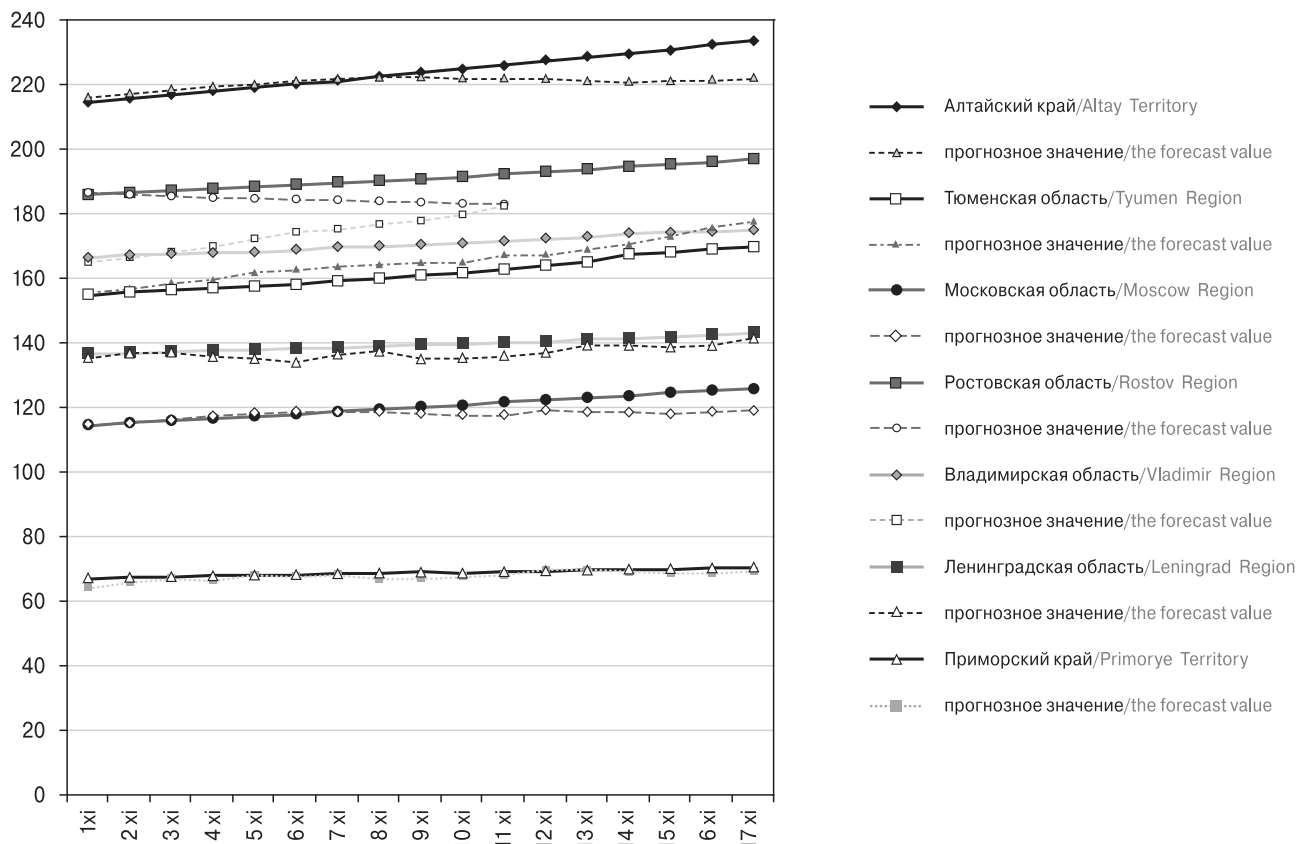


Рисунок. Прогноз смертности Y на $1, \dots, 17.xi$ на 100 тыс. жителей
 Figure. Predicting the mortality Y on the 1st... 17th Nov on 10^5 population

2020 гг. [7], можно предположить, почему смертность из-за COVID-19 в Подмоскowie оказалась в это время ниже. Вблизи Москвы проживает более молодое население и меньше людей старше 70 лет (по отношению к тем, кто младше 25), также здесь стабильно высокие душевые расходы бюджета на здравоохранение. Из-за перечисленного здесь невелик фактор X_3 ; его снизила и более широкая вакцинация взрослых. Также X_3 бывает меньше в регионах, где активнее проводится тестирование на антитела к SARS-CoV-2, отчего возрастает доля нетяжелых случаев, и поэтому больше выздоравливающих [3]. Еще в Московской области в 2019 и 2020 гг. была наименьшая общая смертность в ЦФО (исключая Москву), сравнительно низкие уровни заболеваемости вышеупомянутых восьми классов болезней (исключая болезни органов дыхания и пищеварения). Также здесь относительно низка онкологическая смертность, нет острых проблем с радиоактивным загрязнением территории и загрязнением атмосферного воздуха; поэтому для Подмоскowie принимались следующие значения думми-переменных: $d_1 = d_3 = d_4 = 0$, $d_2 = 1$.

Для читателя с более «продвинутой» математической подготовкой может быть интересно следующее. Нами проверялось выполнение предпосылок теоремы Гаусса–Маркова, в ко-

торой обоснованы хорошие свойства МНК-оценок. Для этого сначала рассматривались коэффициенты корреляций Y^i с каждым из факторов, а также коэффициенты корреляции между факторами. Явление мультиколлинеарности не обнаружено. Гипотеза о нормальности по критерию χ^2 на 5%-м уровне не отвергалась. График эмпирической функции распределения для остатков сравнивался с графиком распределения Гаусса с нулевым средним и стандартом s , где s — несмещенная оценка σ . Наибольшее расхождение графиков $D_n = 0,100$, так что из-за малости $n^{1/2} \cdot D_n$, аналогичный вывод сделан тестом Лиллиефорса [13]. Итак, распределение остатков не противоречит закону Гаусса. Анализ диаграмм рассеяния остатков относительно каждого X_j , а также относительно оценки Y^i , не выявил явного нарушения условия гомоскедастичности. Тест об отсутствии автокорреляции остатков не отвергался. В итоге все предпосылки теоремы были выполнены.

В результате была построена статистическая модель для краткосрочного прогноза смертности в регионах от COVID-19 на текущие сутки, и для нее найдены коэффициенты эластичности. Модель может оказаться полезной при разработке мер борьбы против пандемии в ряде регионов, а также при создании улучшенных секторных моделей (типа SEIRF, SIRD и др.).

Список литературы/References

1. Александров Ю.А. Основы радиационной экологии. Йошкар-Ола: Марийский госуниверситет, 2007. 268 с. [Aleksandrov Yu.A. Fundamentals of radiation ecology. *Yoshkar-Ola: Mariyskii gosuniversitet*, 2007. 268 p. (In Russ.)]
2. Гаврилов Д.В., Абрамов Р.В., Кирилкина А.В., Ившин А.А., Новицкий Р.Э. Модель прогнозирования пандемии COVID-19 на основе машинного обучения в отдельных регионах Российской Федерации // Фармакоэкономика. Современная фармакоэкономика и фармакоэпидемиология. 2021. Т. 14, № 3. С. 342–356. [Gavrilov D.V., Abramov R.V., Kirilkina A.V., Ivshin A.A., Novitskiy R.E. COVID-19 pandemic prediction model based on machine learning in selected regions of the Russian Federation. *Farmakoekonomika. Sovremennaya farmakoekonomika i farmakoepidemiologiya = Farmakoekonomika. Modern Pharmacoconomics and Pharmacoepidemiology*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 342–356. (In Russ.)] doi: 10.17749/2070-4909/farmakoekonomika.2021.108
3. Гольдштейн Э.М. Факторы, влияющие на смертность от новой коронавирусной инфекции в разных субъектах Российской Федерации // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии. 2020. Т. 97, № 6. С. 604–607. [Goldstein E.M. Factors affecting mortality for the novel coronavirus infection in different regions of the Russian Federation. *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunologii = Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology*, 2020, vol. 97, no. 6, pp. 604–607. (In Russ.)] doi: 10.36233/0372-9311-2020-97-6-11
4. Дружинин П.В., Молчанова Е.В. Смертность населения российских регионов в условиях пандемии COVID-19 // Регионоведение. 2021. Т. 29, № 3. С. 666–685. [Druzhinin P.V., Molchanova E.V. Mortality rates in Russian regions in the context of the COVID-19 pandemic. *Regionologiya = Regionology. Russian Journal of Regional Studies*, 2021, vol. 29, no. 3, pp. 666–685. (In Russ.)] doi: 10.15507/2413-1407.116.029.202103.666-685
5. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). Численность врачей всех специальностей (физических лиц) в организациях, оказывающих медицинские услуги населению, на конец отчетного года. [Unified Interdepartmental Information Statistical System (EMISS). The number of doctors of all specialties (individuals) in organizations providing medical services to the population, at the end of the reporting year. (In Russ.)] URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31547>
6. Зайцева Н.В., Май И.В., Рейс Ж., Спенсер П.С., Кирьянов Д.А., Камалтдинов М.Р. К оценке дополнительной заболеваемости населения COVID-19 в условиях загрязнения атмосферного воздуха: методические подходы и некоторые практические результаты // Анализ риска здоровью. 2021. № 3. С. 14–28. [Zaitseva N.V., May I.V., Reis J., Spenser P.S., Kiryanov D.A., Kamaltdinov M.R. On estimating the additional incidence of COVID-19 among populations exposed to polluted ambient air: methodical approaches and some practical results. *Analiz riska zdorov'yu = Health Risk Analysis*, 2021, no. 3, pp. 14–28. (In Russ.)] doi: 10.21668/health.risk/2021.3.02
7. Здравоохранение в России. Приложение к сборнику (информация в разрезе субъектов Российской Федерации). 2021. [Healthcare in Russia — 2021. Appendix to the collection (information in the context of the subjects of the Russian Federation). 2021. (In Russ.)] URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13218>

8. Зинченко Д.И., Куркина Е.С. Компьютерное моделирование распространения эпидемии COVID-19 на примере Германии // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35, № 10 (245). С. 72–75. [Zinchenko D.I., Kurkina E.S. Computational modelling of the spread of the COVID-19 epidemic on the example of Germany. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 2021, vol. 35, no. 10 (245), pp. 72–75. (In Russ.)]
9. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Агеева А.Ф. Моделирование эпидемии COVID-19 — преимущества агент-ориентированного подхода // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2020. Т. 13, № 4. С. 58–73. [Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Ageeva A.F. COVID-19 epidemic modeling — advantages of an agent-based approach. *Ekonomicheskiye i sotsial'nyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz = Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 58–73. (In Russ.)] doi: 10.15838/esc.2020.4.70.3
10. Охрана окружающей среды в России 2020. Приложение (информация в разрезе субъектов Российской Федерации). М.: Росстат, 2020. [Environmental Protection in Russia 2020. Appendix (information in the context of the constituent entities of the Russian Federation). Moscow: Rosstat, 2020. (In Russ.)] URL: https://gks.ru/bgd/regl/b20_54/Main.htm
11. Регионы России. Социально-экономические показатели: стат. сб. М.: Росстат, 2021. 1114 с. [Regions of Russia. Socio-economic indicators: statistics digest. Moscow: Rosstat, 2021. 1114 p. (In Russ.)] URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2021.pdf
12. Степанов В.С. Зависимость уровня смертности в регионах от распространенности активных носителей SARS-CoV-2 и ресурсов организаций здравоохранения // Анализ риска здоровью. 2020. № 4. С. 12–23. [Stepanov V.S. Dependence between mortality in regions and prevalence of active SARS-CoV-2 carriers and resources available to public healthcare organizations. *Analiz riska zdorov'yu = Human Risk Analysis*, 2020, no. 4, pp. 12–23. (In Russ.)] doi: 10.21668/health.risk/2020.4.02
13. Степанов В.С. Связь онкологической заболеваемости с возрастом населения, проживающего при неблагоприятных факторах окружающей среды // Врач и информационные технологии. 2021. № 3. С. 38–49. [Stepanov V.S. The relationship of cancer prevalence with age of the population living under adverse environmental factors. *Vrach i informatsionnyye tekhnologii = Medical Doctor and Information Technology*, 2021, no. 3, pp. 38–49. (In Russ.)] doi: 10.25881/18110193_2021_3_38
14. Стопкоронавирус.рф. Официальная информация о коронавирусе в России. [Official statistical data on the novel coronavirus in Russia's regions (In Russ.)] URL: <https://стопкоронавирус.рф/information>
15. Янчевская Е.Ю., Меснянкина О.А. Математическое моделирование и прогнозирование в эпидемиологии инфекционных заболеваний // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина. 2019. Т. 23, № 3. С. 328–334. [Yanchevskaya E.Yu., Mesnyankina O.A. Mathematical modelling and prediction in infectious disease epidemiology. *Vestnik Rossiiskogo Universiteta Druzhy Narodov. Seriya: Meditsina = RUDN Journal of Medicine*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 328–334. (In Russ.)] doi: 10.22363/2313-0245-2019-23-3-328-334
16. Friedman J., Liu P., Troeger C.E., Carter A., Reiner R.C. Jr., Barber R.M., Collins J., Lim S.S., Pigott D.M., Vos Th., Hay S.I., Murray C.J.L., Gakidou Em. Predictive performance of international COVID-19 mortality forecasting models. *Nature Communications*, 2021, vol. 12: 2609. 38 p. doi: 10.1038/s41467-021-22457-w
17. Kurkina E.S., Koltsova E.M. Mathematical modeling of the propagation of COVID-19 pandemic waves in the world. *Computational Mathematics and Modeling*, 2021, vol. 32, no. 2, pp. 46–79. doi: 10.1007/s10598-021-09523-0
18. Lifshits M.L., Neklyudova N.P. COVID-19 mortality rate in Russian regions: forecasts and reality. *R-economy*, 2020, vol. 6, no. 3, pp. 171–182. doi: 10.15826/recon.2020.6.3.015
19. Wang Y., Xu Ch., Yao S., Zhao Y., Li Y., Zhao X. Estimating the prevalence and mortality of coronavirus disease 2019 (COVID-19) in the USA, the UK, Russia, and India. *Infection and Drug Resistance*, 2020, vol. 13, pp. 3335–3350. doi: 10.2147/IDR.S265292

Автор:

Степанов В.С., к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ФГУН Центральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия.

Author:

Stepanov V.S., PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.

Поступила в редакцию 14.12.2021
Принята к печати 11.05.2022

Received 14.12.2021
Accepted 11.05.2022